

基于片烟干燥动力学的 REA 模型与薄层干燥模型的对比

陈国钦¹, 李巧灵¹, 陈河祥¹, 曾强¹, 邓惜汝², 车黎明², 陈晓东^{*2}, 李跃锋^{*1}

1. 福建中烟工业有限责任公司技术中心, 福建省厦门市集美区滨水路 298 号 361021

2. 厦门大学化学化工学院, 福建省厦门市思明南路 422 号 361005

摘要: 为了获得最适用于烟草干燥的动力学模型, 达到设计、优化和控制烟草干燥过程的目的, 采用湿度发生器联用热重技术(TGA)研究了 65 °C & RH 15%、75 °C & RH 10%和 85 °C & RH 5%条件下片烟的干燥动力学行为, 并利用 REA(Reaction engineering approach)以及 8 种经验或半经验的薄层干燥模型分别对不同温湿度条件下的片烟干燥行为进行模拟。结果表明: ①干燥温度越高, 相对湿度越小时, 片烟的干燥速率越快, 平衡含水率越低; ②REA 模型预测的片烟干燥动力学曲线与实验曲线能够很好地吻合, 尤其是在含水率由 20%降至 12%阶段; 8 种薄层干燥模型中 Two term 模型拟合出的 R^2 值最大, 均方根误差(RMSE)最小, 是描述片烟干燥行为较合适的模型; ③薄层干燥模型仅仅是获得特定温湿度条件下相对应的动力学参数, 而 REA 模型是将温度和湿度作为变量引入模型中, 模型中的动力学参数可以描述任意温湿度条件下的片烟干燥动力学行为; ④REA 模型构造简单, 预测准确快速, 较 Two term 模型更具有普适性、实用性。

关键词: 片烟; 干燥动力学; 湿度发生器; 热重技术; REA 模型; 薄层干燥模型

中图分类号: TS452 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-0861(2017)06-0061-07

Comparison between REA model and thin layer drying model based on strip drying kinetics

CHEN Guoqin¹, LI Qiaoling¹, CHEN Hexiang¹, ZENG Qiang¹, DENG Xiru², CHE Liming², CHEN Xiaodong^{*2}, LI Yuefeng^{*1}

1. Technology Center, China Tobacco Fujian Industrial Co., Ltd., Xiamen 361021, Fujian, China

2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China

Abstract: In order to select a kinetic model best fit for the design, optimization and control of tobacco drying process, the drying kinetic behavior of tobacco strips under the conditions of 65 °C & RH 15%, 75 °C & RH 10%, 85 °C & RH 5% was investigated with a humidifier combined with TGA (Thermogravimetric analyzer). The drying behavior of tobacco strips was simulated by REA (Reaction engineering approach) model and eight selected thin layer drying models (semi-empirical or empirical). The results showed that: 1) With the rise of temperature and decrease of humidity, the drying rate of strips raised and the equilibrium moisture content of strips lowered. 2) The drying kinetic curves predicted by REA model well agreed with experimental curves, especially at the stage when the moisture content decreased from 20% to 12%. Among eight thin layer drying models, Two term model was the best for predicting the drying behavior of strips with the highest R^2 (determination coefficient) and the lowest RMSE (root mean square error). 3) Thin layer drying model reflected only the kinetic parameters corresponding to specified drying conditions, while in the REA model the

收稿日期: 2016-08-30 修回日期: 2016-12-01

基金项目: 福建中烟工业有限公司科技项目“干燥工艺对烟丝热解条件下挥发分的影响研究”(FJZYJH201501)。

作者简介: 陈国钦(1984—), 博士, 工程师, 主要从事片烟干燥与热解研究。E-mail: cgq10696@fjtic.cn; *通讯作者: 李跃锋, E-mail: lyf10495@fhtic.cn; 陈晓东, E-mail: xdc@xmu.edu.cn

引文格式: 陈国钦, 李巧灵, 陈河祥, 等. 基于片烟干燥动力学的 REA 模型与薄层干燥模型的对比[J]. 烟草科技, 2017, 50(6): 61-67. (CHEN Guoqin, LI Qiaoling, CHEN Hexiang, et al. Comparison between REA model and thin layer drying model based on strip drying kinetics[J]. Tobacco Science & Technology, 2017, 50(6): 61-67.) DOI: 10.16135/j.issn1002-0861.2016.0416

temperature and humidity served as variables, it enabled the kinetic parameters in REA model to describe the drying kinetic behavior at any drying condition. 4) REA model was simple in structure, fast and accurate in prediction, more universal and practical than Two term model.

Keywords: Strip; Drying kinetics; Humidifier; TGA; REA model; Thin layer drying model

干燥脱水是烟草物料加工中的关键热湿环节,贯穿了烟叶原料从采后初烤、打叶复烤到制丝的整个加工流程^[1]。烟草干燥过程中,介质温湿度的变化对于烟草加工物理质量及感官质量均有一定程度的影响,建立干燥过程的数学模型一方面可以开发新的干燥系统或者对已有的干燥系统进行改进,另一方面又可以准确地控制干燥过程以及减少能耗。目前薄层干燥模型被广泛应用于描述农作物的干燥特性,包括烟草。在这些干燥模型中主要是半经验或者经验模型,如 Newton、Page、Modified Page、Henderson & Pabis、Logarithmic、Two term、Wang and Singh 和 Midilli 等^[2-8]。对于半经验或者经验模型而言,它们的优点是可以通过简单的数学方程以及非线性拟合的手段来模拟物料在特定干燥条件下的干燥行为(通常是得到一系列质量损失随时间变化的数学关系),然而这些模型无法体现物料的干燥特性,因此具有一定的局限性。一个好的干燥模型要求其简单、准确、稳定并可以体现物料的干燥特性,且所需要的计算时间较短,有利于工厂尽快做出工艺调整。REA 模型是 1996 年由陈晓东等人首先提出^[9],并用其模拟了多种物料的干燥过程^[10-12],它是一种描述颗粒和薄片物质干燥过程的新方法,对于模拟对流干燥过程表现出良好的准确性和稳定性,并已成功加载到 CFD (Computational fluid dynamics) 中用于模拟喷雾干燥过程^[13]。不同的模型其方程的组成差异很大,大部分模型对于特定实验条件的拟合效果较好,但当实验条件的范围扩大时,则更需要能够模拟综合实验条件下的模型。基于此,作者在片烟干燥特性研究的基础上,分别利用 REA 模型和 8 种薄层干燥模型模拟片烟在不同温湿度条件下的干燥行为,旨在为片烟干燥动力学特性的分析和评价提供更为准确和适用的模型。

1 材料与方法

1.1 材料、设备与仪器

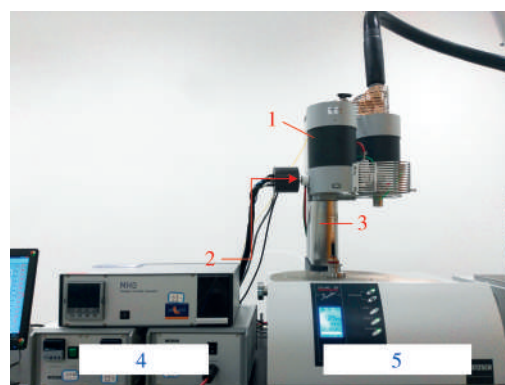
试验片烟样品为 2014 年云南大理中部烟 C3F 等级烤烟。实验前,将片烟含水率调节至 $(20 \pm 0.5)\%$ (使用标准烘箱法测定片烟的含水率)。

NETZSCH STA 449 F3 TG-DTA/DSC 同步热

分析仪、Modular Humidity Generator 湿度发生器(德国耐驰公司);BSA224S-CW 电子天平(感量 0.000 1 g,德国赛多利斯公司);DHG-9623A 烘箱(上海精宏试验设备有限公司)。

1.2 方法

实验装置如图 1 所示。首先根据实验要求设定同步热分析仪内所需的干燥温度,待炉温升高至设定温度后开启湿度发生器,然后设定湿度发生器内气流(空气+水蒸气)的干燥温度(与同步热分析仪所设定的温度保持一致)以及干燥湿度,气流流速为 100 mL/min,观察炉膛内的温湿度数据,待炉膛内的温湿度达到实验要求并保持稳定时,打开同步热分析仪的炉体,将含水率为 20%的片烟(1 cm×1 cm)迅速放在氧化铝平板坩埚上(如图 2



1. 炉体 2. 预热空气+水蒸气 3. 氧化铝平板坩埚
4. 湿度发生器 5. 同步热分析仪

图 1 湿度发生器联用同步热分析仪装置图

Fig.1 Humidifier combined with TGA

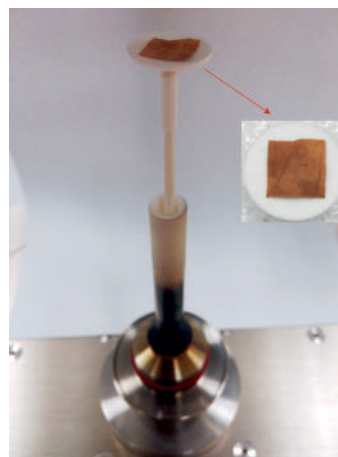


图 2 氧化铝平板坩埚和片烟样品

Fig.2 Al_2O_3 pan and tobacco sample

所示),之后关闭炉体,同时采集实验数据。片烟在所设定的温湿度条件下进行恒温恒湿干燥。待干燥试验结束后,关闭湿度发生器,升高炉体温度至 105 ℃ 恒定,此时片烟的质量继续下降直至平衡,得到片烟的干基质量。

1.3 REA 干燥模型

REA 模型是利用化学反应工程的原理来模拟干燥动力学,认为干燥过程是水分的蒸发和冷凝共同竞争的过程^[9],因此对于片烟的干燥过程,其干燥速率可由式(1)来描述:

$$\frac{dm_w}{dt} = m_t \frac{dX}{dt} = -h_m A (\rho_{v,s} - \rho_{v,b}) \quad (1)$$

式中: m_w 和 m_t 分别是水和片烟的质量(kg); t 是时间(s); X 是片烟的干基含水率(kg·kg⁻¹); h_m 是传质系数(m·s⁻¹); A 是片烟的表面积(m²); $\rho_{v,s}$ 是片烟-空气界面上的蒸汽浓度(kg·m⁻³); $\rho_{v,b}$ 是干燥条件下的蒸汽浓度(kg·m⁻³)。

REA 模型假设水分蒸发是一个活化过程,必须克服活化能才得以发生,而水分冷凝则是一个自发的过程。因此片烟-空气界面上的蒸汽浓度 $\rho_{v,s}$ 可利用 Arrhenius 方程表示为:

$$\rho_{v,s} = \rho_{v,sat}(T) \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) \quad (2)$$

式中: ΔE 是表观活化能(J·kg⁻¹); T 是干燥温度(K); $\rho_{v,sat}(T)$ 是对应干燥温度(T)下的饱和蒸汽浓度(kg·m⁻³); $\rho_{v,sat}(T)$ 和 $\rho_{v,b}$ 可由式(3)和式(4)计算得到^[14]:

$$\rho_{v,sat}(T) = 10^{-3} \times \left[\exp(31.371 - \frac{6014.79}{T} - 7.92495 \times 10^{-3} T) \right] / T \quad (3)$$

$$\rho_{v,b} = RH \% \times \rho_{v,sat}(T) \quad (4)$$

质量平衡方程(1)可以由式(5)表达:

$$m_t \frac{dX}{dt} = -h_m A \left[\exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) \rho_{v,sat}(T) - \rho_{v,b} \right] \quad (5)$$

引入无量纲“相对活化能($\Delta E/\Delta E_e$)”,其中(ΔE_e)是平衡活化能。REA 模型假设在不同的干燥条件下,相对活化能与自由水之间的关系是一致的,因此当片烟在任意条件下干燥时,相对活化能和自由水($X-X_e$)的关系如下:

$$\frac{\Delta E}{\Delta E_e} = g(X-X_e) \quad (6)$$

$$\Delta E_e = -RT \ln\left(\frac{\rho_e}{\rho_{v,sat}(T)}\right) \quad (7)$$

式中: X_e 是平衡干基含水率,平衡活化能(ΔE_e)可以由相对湿度($\rho_e/\rho_{v,sat}(T)$)和干燥温度(T)计算得

到。相对活化能代表水分从片烟中移除的难易程度。当片烟中含水率较高时,水分较容易蒸发出来,随着干燥过程的进行,片烟中的含水率下降,则相对活化能将逐渐升高,水分较难蒸发出来。当片烟中的水分达到平衡时($X=X_e$),此时的相对活化能($\Delta E/\Delta E_e$)为 1。

根据方程(5)和(7),方程(6)可以变形如下:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta E}{\Delta E_e} &= \frac{-RT \ln\left(\frac{-m_t \frac{dX}{dt} \times \frac{1}{h_m A} + \rho_e}{\rho_{v,sat}(T)}\right)}{-RT \ln\left(\frac{\rho_e}{\rho_{v,sat}(T)}\right)} \\ &= \frac{\ln\left(\frac{-m_t \frac{dX}{dt} \times \frac{1}{h_m A} + \rho_e}{\rho_{v,sat}(T)}\right)}{\ln\left(\frac{\rho_e}{\rho_{v,sat}(T)}\right)} = g(X-X_e) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: dX/dt 可以从 TGA 实验中获得,传质系数(h_m)可由以下方程计算得到:

$$h_m = \frac{Sh D_e}{d_t} \quad (9)$$

$$D_e = 2.12 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{273.15}\right)^2 \quad (10)$$

$$Sh = 0.989 Re^{1/3} Sc^{1/3} \quad (11)$$

$$Re = \frac{d_t U \rho}{\mu} \quad (12)$$

$$Sc = \frac{\mu}{D_e \rho} \quad (13)$$

$$\rho = 352 T^{-0.9992} \quad (14)$$

$$\mu = -2.432 \times 10^{-11} T^2 + 6.153 \times 10^{-8} T + 2.22 \times 10^{-6} \quad (15)$$

式中: Sh 是 Sherwood 数; D_e 是干燥气体的扩散系数(m²/s)^[15]; d_t 是片烟的厚度(m); Re 是 Reynolds 数; Sc 是 Schmidt 数; U 是干燥气体流速(m/s); ρ 和 μ 分别是干燥气体的密度(kg·m⁻³)^[15]和黏度(kg·s⁻¹·m⁻¹)^[16]。

通过以上方程,相对活化能($\Delta E/\Delta E_e$)可以通过实验数据计算得到,之后通过一元四次方程拟合得到相对活化能($\Delta E/\Delta E_e$)与自由水($X-X_e$)的关系。由于 REA 模型强调的是物料的干燥特性,不同的物料,其相对活化能($\Delta E/\Delta E_e$)与自由水($X-X_e$)的关系是不同的,因此此关系可以称为物料的 REA 特征指纹信息^[9]。然而对于具有相似物理结构的干燥物料,只要其具有相似的起始含水率,则可以将相对活化能($\Delta E/\Delta E_e$)与自由水($X-X_e$)的关系扩展到不同的干燥条件。

1.4 8 种薄层干燥模型

8 种常用于描述物质干燥动力学的干燥模型

见表1。基于干燥时的TGA数据,这些模型中的含水率(MR)可由式(16)计算^[16]:

$$MR = \frac{m_t - m_e}{m_i - m_e} \quad (16)$$

式中: m_t 是片烟的实时质量(kg); m_i 是片烟的初始质量(kg); m_e 是干燥过程结束时片烟的平衡质量(kg)。

决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)是选择最佳模型的主要标准^[17-18]。具有最大的 R^2 值和最小RMSE的模型即为最合适的模型^[19-20], R^2 和RMSE可由式(17)和(18)计算:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})(MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})^2 \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre})^2}} \quad (17)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

式中: $MR_{pre,i}$ 是*i*点MR的拟合值; $MR_{exp,i}$ 是*i*点MR的实验值; N 是实验点数。

表1 8种薄层干燥模型^[2-8]

Tab.1 Eight thin layer drying models

序号	模型名称	公式	参考文献
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$	[2]
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[2]
3	Modified Page	$MR = \exp[-(kt)^n]$	[3]
4	Henderson & Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	[4]
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	[5]
6	Two term	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	[6]
7	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	[7]
8	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	[8]

2 结果与讨论

2.1 不同温湿度条件下片烟的干燥特性曲线

片烟在65℃&RH15%、75℃&RH10%和85℃&RH5%的干燥条件下的动力学曲线如图3所示。从图3可以看出,不同干燥条件下片烟的含水率随干燥时间的变化规律基本一致,含水率随干燥时间的延长不断减小,最终降低至平衡含水率。在干燥初期曲线斜率较大,含水率下降较明显,干燥后期曲线平缓,该过程与生物物质的干燥过程相似^[21-22]。在高温和低湿条件下,片烟的干燥速率快且平衡含水率低,这种趋势与张建文等^[23]、李建欣等^[24]的研究结果相同。

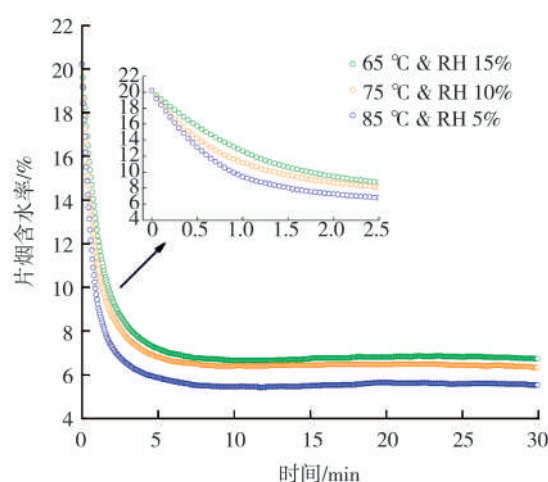


图3 不同温湿度条件下片烟含水率随时间的变化曲线

Fig.3 Variation of moisture content in tobacco strips along with drying time at different temperatures and humidity

2.2 REA干燥模型拟合结果

根据方程(8),片烟在不同干燥条件下的相对活化能可以由TGA实验测得的干燥曲线计算得到。图4为相对活化能($\Delta E/\Delta E_e$)与自由水($X-X_e$)的关系曲线。在干燥的初始阶段,相对活化能较低,片烟中的自由水较多;随着干燥的继续,水分不断蒸发,片烟中的水分减少至平衡含水率,此时的相对活化能为1,说明干燥已达到平衡,不再继续干燥。从图4中可以看出,在3个不同的干燥条件下,相对活化能($\Delta E/\Delta E_e$)与自由水($X-X_e$)的3条关系曲线基本重合,说明相对活化能($\Delta E/\Delta E_e$)与自由水($X-X_e$)的关系受干燥条件的影响可以忽略。利用一元四次方程进行拟合,结果如下($R^2=0.979$):

$$\frac{\Delta E}{\Delta E_e} = 1 - 1.098.56 \times (X - X_e)^4 + 404.74 \times (X - X_e)^3 - 40.37 \times (X - X_e)^2 - 0.78 \times (X - X_e) \quad (19)$$

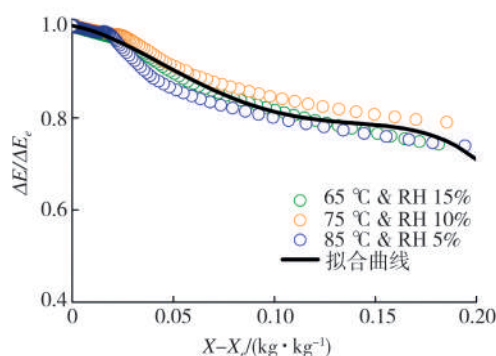


图4 相对活化能($\Delta E/\Delta E_e$)与自由水($X-X_e$)的关系

Fig.4 Relationship between normalized activation energy ($\Delta E/\Delta E_e$) and free water ($X-X_e$)

通过以下步骤,利用 REA 模型对片烟的干燥特性曲线进行拟合:①片烟的起始质量和含水率以及干燥的温湿度条件,都与实验条件一致赋值;②根据方程(11)计算 Sh 的值,然后根据方程(9)得到传质系数 h_m ;③根据方程(3)计算饱和蒸汽浓度,根据方程(7)和(16)计算平衡活化能和表观活化能;④根据方程(1)计算干燥速率 dm_w/dt ;⑤下一时刻片烟的质量根据起始片烟质量以及计算得到的干燥速率求得;⑥根据步骤⑤可以计算下一时刻片烟的质量和含水率,然后重复②~⑤步骤,得到干燥全过程的片烟质量和含水率随时间的变化值。

图 5 为片烟在 65℃&RH15%,75℃&RH10%和 85℃&RH5%干燥条件下利用 REA 模型预测的片烟干燥曲线与实验值的对比结果。总体而言,拟合值与实验值能够很好地重合,尤其是在含水率

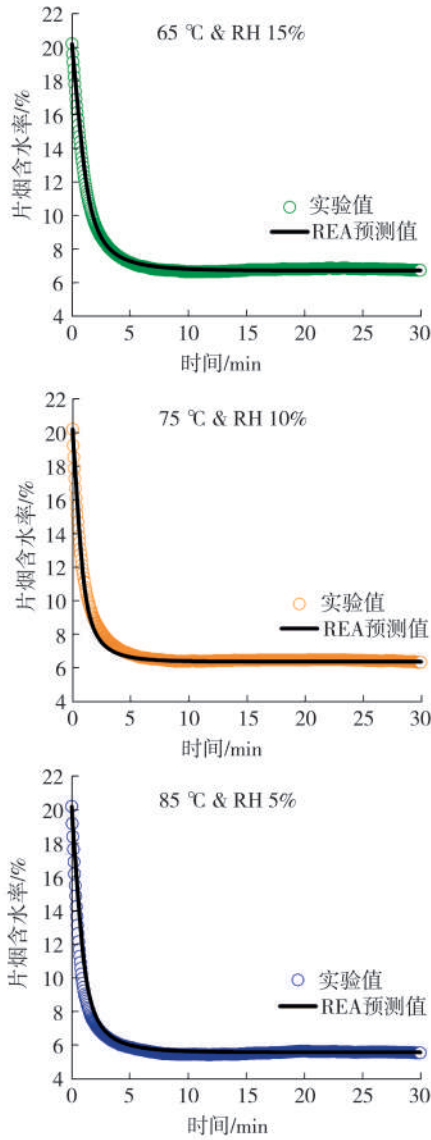


图5 片烟干燥曲线的 REA 模型预测值与实验值的对比图
Fig.5 Comparison of tobacco drying curves obtained by experiment and predicted by REA model

从 20%降低至 12%左右时。说明 REA 模型能够比较精确地描述和预测片烟水分在不同温湿度条件下的变化规律。

2.3 8种薄层干燥模型拟合结果

根据表 1 中介绍的 8 种薄层干燥模型对实验数据进行非线性拟合,计算得到的 R^2 和 RMSE 的值如表 2 所示。由表 2 可以看出,除了 Wang and Singh 模型,其他模型均能对干燥数据进行较好地拟合,其中 Two term 模型的 R^2 值最大, RMSE 值最小,这是因为 Two term 模型中所假设的参数个数较多,因此拟合效果最好。

2.4 REA 模型与 Two term 薄层干燥模型的对比

根据 2.2 节和 2.3 节的结果,REA 模型和 Two term 模型都可以较好地模拟片烟在不同温湿度下的干燥行为。然而,REA 模型将片烟中水分的蒸发过程与 Arrhenius 方程进行关联,并将干燥的温湿度条件引入模型中作为变量,根据实验数据建立了相对活化能($\Delta E/\Delta E_c$)与自由水($X-X_c$)的关系(式 16),即片烟的 REA 特征指纹信息,且此关系不受干燥条件的影响,因此只要确定了干燥实验条件,就可以对综合条件下片烟干燥的动力学曲线进行模拟预测。同时 REA 模型的构建简单,所需要的实验数据少,预测准确快速。

Two term 薄层干燥模型属于经验模型,无法反映传热传质过程的机理,只是将实验数据与方程进行非线性的数学拟合,方程中的参数不具有实际意义,因此该模型对于特定实验条件下的干燥行为模拟较好,一旦实验条件改变,则需要重新拟合,即 Two term 薄层干燥模型无法体现物料的干燥特性,模型中的参数随着干燥条件的变化而变化(如表 2 所示),因此无法反映出干燥条件对片烟干燥行为的影响程度,不具备对综合条件下片烟干燥动力学行为的预测能力。

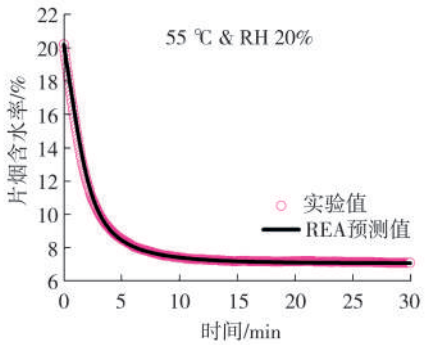


图 6 55℃&RH 20%干燥条件下片烟干燥曲线的 REA 模型预测值与实验值的对比图
Fig.6 Comparison of tobacco drying curves obtained by experiment and predicted by REA model at 55 °C & RH 20%

表 2 8 种薄层干燥模型的拟合结果

Tab.2 Fitting results of eight thin layer drying models

模型名称	湿度/%	温度/℃	参数值	R^2	RMSE
Newton	15	65	$k=0.866\ 7$	0.996	0.008\ 9
	10	75	$k=1.062\ 5$	0.978	0.017\ 1
	5	85	$k=1.352\ 9$	0.986	0.012\ 7
Page	15	65	$k=0.897\ 0, n=0.902\ 7$	0.998	0.006\ 2
	10	75	$k=1.101\ 2, n=0.763\ 8$	0.995	0.007\ 9
	5	85	$k=1.323\ 0, n=0.818\ 1$	0.994	0.008\ 3
Modified Page	15	65	$k=0.886\ 5, n=0.902\ 7$	0.998	0.006\ 2
	10	75	$k=1.134\ 5, n=0.764\ 0$	0.995	0.007\ 9
	5	85	$k=1.407\ 8, n=0.818\ 2$	0.994	0.008\ 3
Henderson and Pabis	15	65	$a=0.966\ 5, k=0.835\ 9$	0.996	0.008\ 2
	10	75	$a=0.895\ 0, k=0.935\ 2$	0.985	0.014\ 2
	5	85	$a=0.942\ 2, k=1.265\ 7$	0.988	0.011\ 8
Logarithmic	15	65	$a=0.966\ 9, k=0.849\ 5, c=0.003\ 6$	0.997	0.007\ 5
	10	75	$a=0.898\ 3, k=0.985\ 8, c=0.009\ 8$	0.991	0.010\ 9
	5	85	$a=0.943\ 7, k=1.289\ 8, c=0.003\ 7$	0.989	0.011\ 3
Two term	15	65	$a=0.581\ 0, b=0.429\ 9, k_0=1.335\ 0, k_1=0.554\ 0$	0.999	0.004\ 8
	10	75	$a=0.645\ 8, b=0.344\ 6, k_0=1.846\ 0, k_1=0.478\ 9$	0.997	0.005\ 9
	5	85	$a=0.247\ 4, b=0.766\ 7, k_0=0.532\ 5, k_1=2.025\ 5$	0.998	0.004\ 3
Wang and Singh	15	65	$a=-0.131\ 0, b=0.003\ 6$	0.493	0.251\ 0
	10	75	$a=-0.131\ 0, b=0.003\ 5$	0.459	0.261\ 5
	5	85	$a=-0.132\ 2, b=0.003\ 6$	0.393	0.274\ 0
Midilli	15	65	$a=1.030\ 5, b=0.000\ 1, k=0.934\ 3, n=0.875\ 3$	0.998	0.005\ 3
	10	75	$a=1.044\ 3, b=0.000\ 3, k=1.156\ 0, n=0.738\ 5$	0.998	0.004\ 9
	5	85	$a=1.056\ 3, b=0.000\ 1, k=1.389\ 0, n=0.774\ 7$	0.995	0.007\ 6

例如,目前需要预测干燥条件为 55 ℃ &RH20%的片烟干燥曲线,根据上述已经建立的 REA 模型,按照 2.2 节所介绍的方法,可以得到此干燥曲线,如图 6 所示;而根据 Two term 薄层干燥模型是无法预测未知条件的干燥曲线。将此预测曲线与实验曲线再次进行对比,结果显示 2 条曲线基本吻合,再次说明了 REA 模型应用于预测综合条件下片烟干燥动力学行为的准确性。

3 结论

(1)在片烟干燥初始阶段,片烟的含水率迅速降低,随着干燥时间的延长,片烟的含水率逐渐缓慢降低到平衡含水率。干燥温度越高,相对湿度越小时,片烟的干燥速率越快,平衡含水率越低。

(2)REA 模型将干燥的温湿度条件都引入模型中作为变量,并获取了片烟的 REA 特征指纹信息,即属于片烟的相对活化能($\Delta E/\Delta E_0$)与自由水($X-X_0$)的关系,此关系不受干燥条件的影响,只代表物料的干燥特性,因此使得同一套 REA 模型的动力学参数可以描述不同干燥条件下的片烟干燥

动力学行为。8 种薄层干燥模型中,Two term 模型的 R^2 值最大, RMSE 最小,是 8 种薄层干燥模型中描述片烟干燥行为较合适的模型。但经验模型无法获得片烟的干燥特性,模型中的参数是基于一定的实验条件而确定的,一旦某个实验条件改变,模型中的参数需要相应改变,即不具有通用性。

(3)REA 模型的构建简单,所需要的实验数据少,可以预测综合干燥条件下片烟干燥动力学行为,且预测准确快速。对于烟草企业而言,获得片烟在综合干燥条件下的动力学模型较片烟在特定干燥条件下的动力学模型更具适用性。由于 REA 模型重在获取物料的干燥特性,其相对活化能与自由水之间的关系是由物料的自身干燥特性决定的,不受干燥温湿度条件的影响,因此它更加符合烟草企业的需求。

参考文献

- [1] 黄锋,陈清,王乐,等. 片烟增湿与干燥的薄层动力学模型[J]. 中国烟草学报, 2014, 20(6): 34-40.
HUANG Feng, CHEN Qing, WANG Le, et al. Study

- on thin-layer dynamic models of humidifying and drying of tobacco strips[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2014, 20(6):34–40.
- [2] Jayas D S, Cenkowski S, Pabis S, et al. Review of thin-layer drying and wetting equations[J]. *Drying Technology*, 1991, 9(3):551–588.
- [3] Doymaz I, Ismail O. Drying characteristics of sweet cherry[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2011, 89(1):31–38.
- [4] Henderson S M, Pabis S. Grain drying theory: I. Temperature effects on drying coefficient[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1961, 6(3):169–174.
- [5] Motevali A, Abbaszadeh A, Minaei S, et al. Effective moisture diffusivity, activation energy and energy consumption in thin-layer drying of jujube[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2012, 14(3):523–532.
- [6] Menges H O, Ertekin C. Thin layer drying model for treated and untreated Stanley plums[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(15/16):2337–2348.
- [7] Sacilik K, Elicin A K. The thin layer drying characteristics of organic apple slices[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 73(3):281–289.
- [8] Midilli A, Kucuk H, Yapar Z. A new model for single-layer drying[J]. *Drying Technology*, 2002, 20(7):1503–1513.
- [9] Chen X D, Xie G Z. Fingerprints of the drying behaviour of particulate or thin layer food materials established using a reaction engineering model[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 1997, 75(4):213–222.
- [10] Chen X D, Peng X F. Modified *Biot* number in the context of air drying of small moist porous objects[J]. *Drying Technology*, 2005, 23(1/2):83–103.
- [11] Chen X D, Lin S X Q. Air drying of milk droplet under constant and time-dependent conditions[J]. *AIChE Journal*, 2005, 51(6):1790–1799.
- [12] Chen X D. The basics of a reaction engineering approach to modeling air-drying of small droplets or thin-layer materials[J]. *Drying Technology*, 2008, 26(6):627–639.
- [13] Patel K C, Chen X D. Prediction of spray-dried product quality using two simple drying kinetics models[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2005, 28(6):567–594.
- [14] Saito H, Šimůnek J, Mohanty B P. Numerical analysis of coupled water, vapor, and heat transport in the vadose zone[J]. *Vadose Zone Journal*, 2006, 5(2):784–800.
- [15] Cai J M, Chen S Y. Determination of drying kinetics for biomass by thermogravimetric analysis under nonisothermal condition[J]. *Drying Technology*, 2008, 26(12):1464–1468.
- [16] Shilton N. Dry air properties[M]//Heldmans D. *Encyclopedia of agricultural, food, and biological engineering*. Boca Raton, FL, USA: Taylor & Francis, 2003:215–218.
- [17] Yaldiz O, Ertekin C, Uzun H I. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes[J]. *Energy*, 2001, 26(5):457–465.
- [18] Özdemir M, Devres Y O. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting[J]. *Journal of Food Engineering*, 1999, 42(4):225–233.
- [19] Ertekin C, Yaldiz O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model[J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 63(3):349–359.
- [20] Midilli A, Kucuk H. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy[J]. *Energy Conversion and Management*, 2003, 44(7):1111–1122.
- [21] Bellur S R, Coronella C J, Vásquez V R. Analysis of biosolids equilibrium moisture and drying[J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2009, 28(2):291–298.
- [22] 熊程程. 褐煤干燥过程的实验研究及动力学分析[D]. 北京:中国科学院工程热物理研究所, 2011.
XIONG Chengcheng. Experimental study and kinetic analysis of lignite drying[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [23] 张建文, 辛亚男, 李斌. 干燥介质温湿度条件对片烟干燥动力学特性的影响[J]. *烟草科技*, 2014(10):15–19.
ZHANG Jianwen, XIN Yanan, LI Bin. Effects of temperature and humidity of drying medium on drying kinetics of strips[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2014(10):15–19.
- [24] 李建欣, 代西梅, 张佳佳, 等. 卷烟原料干燥动力学分析[J]. *湖北农业科学*, 2013, 52(23):5788–5790.
LI Jianxin, DAI Ximei, ZHANG Jiajia, et al. Dynamics analysis of tobacco during process of convection drying[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52(23):5788–5790.

责任编辑 周雅宁